

基于泵吸效应的电磁驱动配气机构温升抑制方案研究

范新宇 常思勤 刘 梁 戴建国

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 根据动圈式电磁驱动配气机构的结构特点和工作原理提出了一种温升抑制方案:利用动圈的泵吸效应,以环形切片作为开关阀片,在无需额外动力源驱动的前提下能够提升动圈与永磁体之间气隙内的气体流量与速度,从而有效强化气隙表面的对流传热效果。通过建立流动区域的数值模型,仿真分析了电磁驱动配气机构工作循环中阀片的响应规律以及气体流动状态,据此对方案结构进行了改进,通过更换材质减轻了阀片的质量并优化了阀片行程。最后开展了配气机构长时间工作下的温升测试试验,结果表明,改进后的方案对执行器温升抑制效果明显,在测量工况下各测量点中最高温升下降 12.1℃。

关键词: 电磁驱动配气机构; 温升抑制; 泵吸效应; 对流传热

中图分类号: U464.1; TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0337-07

Research on Temperature Suppression Scheme of Electromagnetic Valve Train Based on Pumping Effect

Fan Xinyu Chang Siqin Liu Liang Dai Jianguo

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Electromagnetic valve train (EMVT) in camless engine offers large potential for both part load fuel economy and high load engine torque. However, the temperature rise of EMVT at the high engine speed and full load is serious because of its large power density, which barricades the development of EMVT. According to the structure characteristic and operating principle of moving coil electromagnetic valve train, a novel scheme based on pumping effect of moving coil was proposed to enhance the gas flow rate and flow velocity in air gap between the moving coil and permanent magnetics, and strengthen the effect of convective heat transfer without additional drivers. Based on the theoretical analysis of convective heat and mass transfer, the main influential factors of this temperature suppression scheme were got, which includes the gas flow and gas peak velocity in air gap. Numerical model of flow area was established to analyze the dynamic responses of annular throttle-slice and gas flow status, then structure of the scheme was improved accordingly. Simulation results indicate that the improved scheme, of which the material of annular throttle-slices is carbon fiber and its working stroke is 0.2 mm, then the gas flow and peak velocity of each cycle have reached to the maximum about 1.21 mg and 58.9 m/s under typical condition, respectively. Finally the temperature tests of electromagnetic valve train were carried out under long-time operation, results show that the improved scheme has achieved a better efficiency to suppress the temperature of electromagnetic valve train, it has a significant drop about 12.1℃ in maximum for one measuring point under typical condition.

Key words: electromagnetic valve train; temperature suppression; pumping effect; convective heat transfer

收稿日期: 2015-05-29 修回日期: 2015-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51306090)和江苏省自然科学基金项目(BK20130762)

作者简介: 范新宇(1991—),男,博士生,主要从事发动机性能仿真与优化研究, E-mail: fanxinyu91@126.com

通信作者: 常思勤(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆动力装置设计、仿真与优化研究, E-mail: changsq@mail.njust.edu.cn

引言

常规凸轮发动机中配气正时以及气门升程受到凸轮型线的限制,只能在某些工况下达到最佳发动机性能。采用电磁驱动配气机构的无凸轮发动机中,以电磁系统分别独立驱动进排气门的运动,可以实现完全可变的气门运动模式。这对于提高发动机的动力性、燃油经济性,并降低有害气体排放有着巨大的潜力^[1-5]。

动圈式电磁驱动配气机构核心为电磁直线执行器,本课题组经过多年的研究,使执行器实现了快速的运动响应,过渡时间在3~5 ms,精确的位移控制以及良好的气门软着陆性能,满足了在发动机配气机构上应用的基本要求^[6-8]。但是发动机在高转速负荷工况下运行时,执行器的工作频率以及负荷大大提高,其温升将会导致绝缘失效、热应变、永磁体退磁等现象。因此,随着电磁驱动配气机构的发展和应用,有效的散热技术以抑制执行器温升显得尤为重要。

受到配气机构严格的尺寸要求以及其在多缸发动机上布置的空间限制,在电动机中常用的风冷水冷等方式^[9-10]效果固然显著,但却会导致电动机整体尺寸增大,且难以在执行器内部布置应用。本文提出一种应用动圈的泵吸效应来强化对流传热的方案,其对执行器的结构影响很小,且不需要额外的动力源驱动,最终能够有效提升动圈与永磁体之间气隙内的气体流量与速度,强化气隙表面的对流传热,提高对执行器的温升抑制效果。

1 温升抑制方案设计

1.1 电磁直线执行器的热分析

动圈式电磁直线执行器的结构如图1所示,主要由内磁轭、外磁轭、永磁体、动圈等组成^[6],上端为密闭设计以减小磁阻,下端为开口设计便于动圈做往复直线运动。执行器在其运动过程中会产生各种损耗,主要包括铜耗、铁耗以及机械损耗等。这些损耗属于不可逆的能量转化过程,大部分转化为热量导致执行器温度上升。

通过文献[11]的分析可知,执行器的电流密度较大,线圈绕组中的铜耗占据了损耗中的主要部分,其余少量热量来自于铁耗以及摩擦损耗。因此,热源在执行器内部并非均匀分布,各组成部分之间存在温度差,主要的热量集中在动圈以及内芯附近。部分热量以热传导的方式由内而外传递至上端盖板、永磁体乃至外磁轭,最终与空气发生自然对流换热散发出去;同时在动圈与永磁体之间存在着狭长

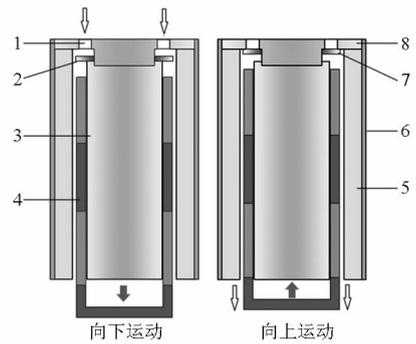


图1 电磁驱动配气机构温升抑制方案示意图

Fig.1 Sketch of temperature suppression scheme of electromagnetic valve train

1. 进气入口 2. 阀片(开启) 3. 内磁轭 4. 动圈
5. 永磁体 6. 外磁轭 7. 阀片(关闭) 8. 盖板

的环形气隙通道,动圈的高速往复运动加剧了气隙通道内的气体流动,部分热量以对流传热的方式传递至空气中。

1.2 温升抑制方案

根据1.1节中对执行器的热分析描述,其主要的热源来自于线圈绕组的铜耗以及磁路中的铁耗所产生的热量。本文所提出的温升抑制方案,是基于动圈的泵吸效应来增强环形气隙通道内的空气流动,提升边界层的对流传热效果,从而直接带走主要热源区域所产生的部分热量。

在盖板上环形均匀布置若干圆孔,以环形切片作为开关阀片,嵌在盖板与内磁轭的联接处。当动圈向下运动时,气隙内真空度增大,外部气体通过盖板上的进气孔进入气隙内;而当动圈向上运动时,气隙内压力迅速上升推动阀片上升至关闭进气入口,从而迫使气流经过动圈与永磁体之间的环形气隙通道向下流动。这种被动式的泵吸循环,靠电磁驱动气门的运动所激发,能够改善气隙内空气循环,加强对流传热效果。相对于常规的散热方式,其不需要额外的能量驱动,且对执行器结构所产生的影响可以忽略。

1.3 方案的影响因素

在该温升抑制方案中,阀片的运动规律直接反映了泵吸效应的有效性,不仅关系到动圈向下运动时的进气状态,同时也是保证其向上运动时关闭进气入口产生强制对流的关键所在。进气过程中的流量为^[12]

$$Q = C_q A_o \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (1)$$

式中 Q ——阀口流量

C_q ——阀口流量系数

A_o ——阀口截面积

Δp ——阀口两侧气体压力差

ρ ——气体密度

阀口的流量系数 C_q 以及截面积 A_o 均取决于结

构的设计,而阀口两侧的气体压力差主要由动圈向下运动的速度所决定。进气流量最大化是所期望的结果,阀片能够快速运动并关闭进气孔则决定了流经环形气隙的气体质量。在此阶段,气体与动圈外表面以及永磁体的内表面均存在对流传热的现象,其过程受到诸多因素的影响:气体的流动状态、热物理性质、边界层的发展以及换热面的几何因素等^[13]。环形通道内外表面的热流密度分别用 q_i 和 q_o 来标记,规定向气体加热为正。

$$\begin{cases} q_i = h_i(T_i - T_m) \\ q_o = h_o(T_o - T_m) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} h_i = \frac{Nu_i k}{D_h} \\ h_o = \frac{Nu_o k}{D_h} \end{cases} \quad (3)$$

式中 T_i ——动圈外表面温度
 T_m ——气体混合平均温度
 T_o ——永磁体内表面温度
 h_i, h_o ——内、外表面的对流换热系数
 k ——气体的导热系数
 D_h ——通道特征尺度,对环形通道为内外直径之差

Nu_i, Nu_o ——环形通道内、外表面的努塞尔数
 对于任何加热速率时内、外表面的努塞尔数的计算式为

$$\begin{cases} Nu_i = \frac{Nu_{ii}}{1 - \frac{q_o}{q_i}\theta_i^*} \\ Nu_o = \frac{Nu_{oo}}{1 - \frac{q_i}{q_o}\theta_o^*} \end{cases} \quad (4)$$

式中 θ_i^*, θ_o^* ——影响因子
 规定 Nu_{ii} 代表单独加热内表面时内表面的努塞尔数, Nu_{oo} 代表单独加热外表面时外表面的努塞尔数。对于强迫对流换热的气体,其 Nu 的准则方程为^[14]

$$Nu = cRe^m Pr^n \quad (5)$$

其中 $Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (6)$

式中 Pr ——气体普朗特数,为 0.7 ~ 0.8
 Re ——气体雷诺数
 v ——气体流速 L ——气隙长度
 μ ——气体动力粘性系数

通过上述的理论分析,该温升抑制方案可行与否取决于气隙内的对流传热过程。在气隙结构不变的情况下,影响对流传热的主要因素是流经环形气隙通道的气体流量以及速度。为了更深入地研究,

需要借助 Fluent 软件来计算电磁气门运动过程中阀片的瞬态响应规律以及通道内的流场分布情况。

2 数值模型与计算方法

研究对象为执行器内部狭长气隙的气体流动,旨在验证该方案的可行性与有效性,因此对于温度场以及传热过程暂不做仿真分析。由于执行器为轴对称结构,为减少仿真计算量,取其轴向半剖面在轴坐标系下建立二维有限元模型。盖板上端环形均匀布置的圆孔则等效为流通截面积相同的环形通道。模型所涉及的主要参数如表 1。

表 1 数值模型基本参数
 Tab.1 Parameters of numerical model

基本参数	数值
入口特征尺度/mm	2.64
出口特征尺度/mm	0.40
阀片材质	Al
阀片厚度/mm	0.3
阀片质量/g	0.21
阀片行程/mm	0.3
动圈行程/mm	8

克努森 (Knudsen) 数是表征流体连续假设是否成立的重要参数^[15],其定义为 $Kn = \lambda/D_h$ 。 λ 为气体分子的平均自由程。在计算模型中虽然气隙通道的出口特征尺度较小,但是其 Kn 数远小于 0.001,仍然属于连续流体,故 Navier - Stokes 方程适用于此,边界速度滑移可以忽略。计算模型采用 SST $k - \omega$ 模型,其对于近壁面区以及边界层外和自由流动区域均具有较高的计算准确度^[16-17],近壁面区对计算网格进行局部加密并采用增强壁面处理法^[18],模型计算网格如图 2 所示。考虑到执行器各部件的加工精度,在数值模型中设定壁面的相对粗糙度为 0.15。

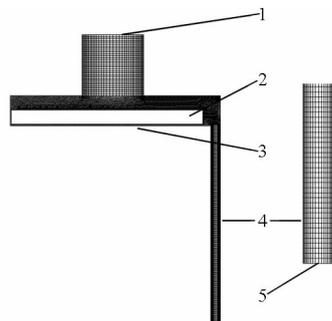


图 2 数值模型网格划分示意图

Fig.2 Distribution curves of numerical model's grid

1. 进气入口 2. 阀片 3. 动圈边界 4. 侧边气隙 5. 气隙出口

模型中动圈边界的运动通过 Profile 文件配置来模拟电磁气门的运动轨迹,区域网格采用分层更

新方式的结构化网格。阀片的运动规律受重力以及气体压力变化共同支配,根据流固耦合的基本理论和方法^[19],借助于用户自定义函数 UDF 中的 DEFINE_CG_MOTION 宏来定义其速度边界条件。受力情况由牛顿第二定律来描述为

$$m_v \frac{d^2x}{dt^2} = F_p - m_v g \quad (7)$$

式中 m_v ——阀片质量

F_p ——阀片受到的轴向气体压力

该区域单独划分为非结构化网格,网格的运动变化采用局部重构法。

3 结果与分析

理想情况下,动圈向下运动打开气门时,阀片处于行程最底端保证进气流量最大化。动圈向上运动关闭气门时,阀片快速达到关闭状态,从而迫使气体从环形狭长气隙下端流出。实际由于重力的影响,阀片向上运动会存在延迟,部分气体直接从上端进气入口流出,没有达到理想的对流传热效果。选取发动机典型工况 4 000 r/min 进行数值计算,电磁气门开闭响应时间均为 4 ms,开启持续期为 10 ms,气门与阀片的运动曲线如图 3 所示。

初始状态时由于重力作用阀片处于最下端即最大开度处。在经过了气门的开启以及保持阶段之后,在 6 ms 时刻气门开始关闭,在此阶段阀片在轴

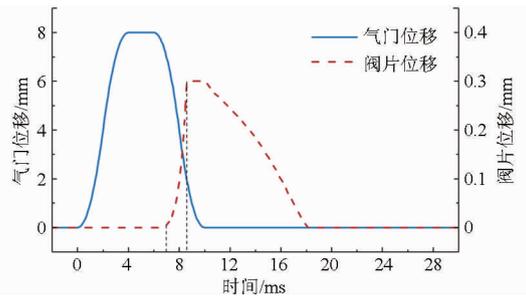


图3 电磁气门与阀片的运动曲线

Fig. 3 Motion curves of electromagnetic valve and throttle-slice

向受到的气体压力逐渐增大。从图 3 中可以看出阀片的运动相对于气门开始关闭时刻滞后了约 1 ms,当阀片达到完全关闭的状态时,气门运动了约整个行程的 3/4。规定由气门开始关闭时刻到阀片达到最大位移的时刻为阀片的响应时间,在此工况下为 2.59 ms。结果表明由于阀片的重力以及气体的流动特性导致了阀片运动的滞后性,使得大部分气体并没有从狭长气隙流出。图 4 为工作循环中不同时刻气隙内气体的速度分布图。

动圈在向下运动的过程中,气隙内真空度骤增,外部气体以高速经过阀口进入气隙直至动圈达到最大开度。受阀口的结构特征影响,在此阶段气隙内会出现明显的滚流现象。当动圈开始向上运动时,气隙内压力升高带动阀片开始向上运动,而此阶段会有部分气体直接从上端进气入口处逸出。直至阀片达到

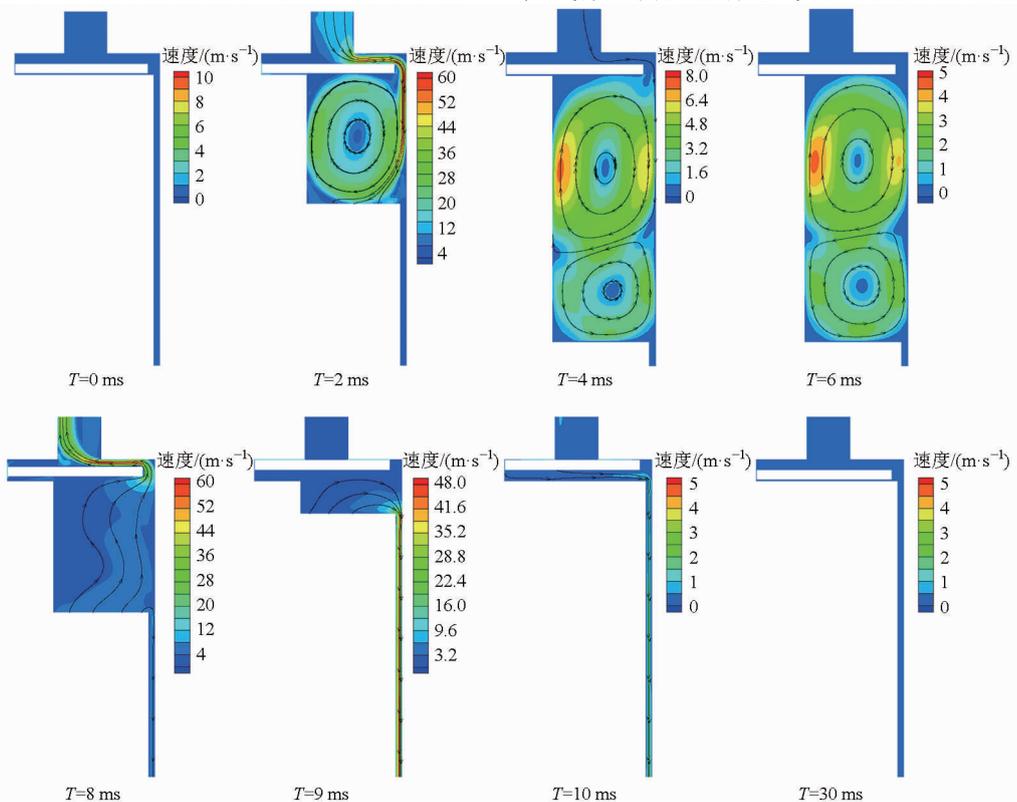


图4 不同时刻气隙内气体速度分布图

Fig. 4 Distribution curves of flow velocity in air gap at different time

顶端关闭入口,气隙内剩余气体才从狭长气隙下端出口流出。为了直观的对泵吸循环的效率,定义有效泵吸率 η_g 为单循环中从下端气隙出口流出的气体量 m_f 与进入气隙内气体总量 m_{in} 之比,即

$$\eta_g = \frac{m_f}{m_{in}} \quad (8)$$

在此工况下,单循环内气门开启阶段气隙内进气量为 1.69 mg。而在气门关闭阶段从环形气隙下端出口流出的气体量为 0.52 mg,有效泵吸率为 30.8%。出入口的气体流量变化如图 5 所示,规定流入为正,流出为负。在 9 ms 时刻,气隙下端出口的气流平均速度达到峰值,为 39.5 m/s。较高的气流速度以及环形通道较小的特征尺度均有助于强化对流传热。

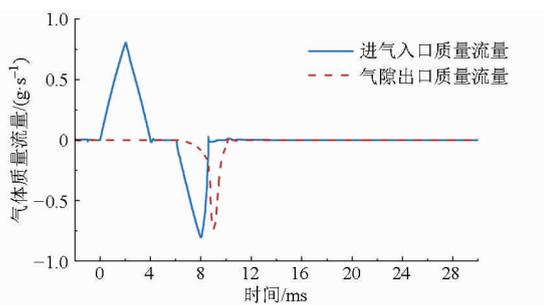


图 5 进气入口以及气隙出口的气体质量流量变化曲线

Fig. 5 Mass flow rate of gas inlet and outlet

4 方案的改进

根据上述理论分析以及仿真研究,上述工况下存在着阀片响应滞后、有效泵吸率低等问题,对此提出相应的改进措施,旨在提高气隙内的气体流量和速度。

4.1 阀片轻量化

阀片的重力影响是导致其响应迟滞的一个重要因素,初始设计采用厚度为 0.3 mm 的铝制阀片。这里选取了更为轻质、强度更高的碳纤维薄板,其厚度为 0.2 mm,重新加工后的阀片质量为 0.09 g。保持阀片的最大行程不变,在相同的工况以及气门运动规律下,阀片的运动曲线如图 6 所示。

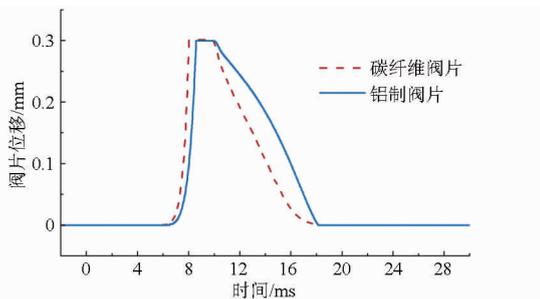


图 6 不同阀片的运动曲线

Fig. 6 Motion curves of different throttle-slices

轻质的碳纤维阀片的响应时间为 2.02 ms,相比铝制阀片快 0.57 ms。在气隙内进气量相同的情况下,碳纤维阀片由于响应速度的加快使得有效泵吸率达到 55.6%,从下端气隙出口流出的气体量可达 0.94 mg,同比增加 80.8%。同时,较大的气体流量也使得流经狭长气隙的气体流速有了大幅的提高,气隙出口平均速度峰值可达 55.8 m/s,同比增加 41.2%。

4.2 阀片行程

阀片行程的改变不仅会影响到动圈下行时气隙内的进气量,也会对有效泵吸率产生重要影响。在相同的工况以及气门运动规律下,分别对阀片行程为 0.1 mm、0.2 mm、0.4 mm 时进行数值计算,并与上文 0.3 mm 行程作对比,其结果如图 7 和图 8。阀片均采用厚度为 0.2 mm 的碳纤维阀片。

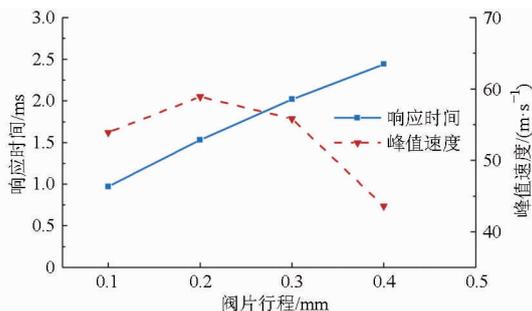


图 7 不同行程下的阀片响应时间和出口峰值速度变化曲线

Fig. 7 Throttle-slice's response time and outlet's peak velocity with variable maximum lift

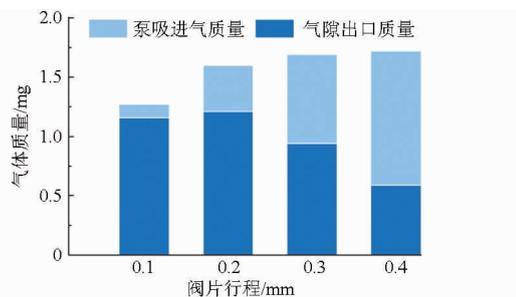


图 8 不同行程下的泵吸进气质量和气隙出口质量

Fig. 8 Intake gas flow and outlet gas flow with variable maximum lift

缩短阀片的行程能够有效减小其响应时间,快速的关闭进气入口进而提升有效泵吸率。计算表明:在阀片行程为 0.4 mm 时,其响应时间为 2.59 ms,有效泵吸率仅为 34.3%。而当其行程为 0.1 mm 时,响应时间仅为 0.97 ms,有效泵吸率高达 91.3%。但是这并不意味着越小的行程能够带来最佳的效果。阀片行程的减小同时会带来另外的负面影响,气门向下运动时气隙内进气量随之下降,其下降幅度随着行程的减小更加明显。从

图8中可以得知,阀片行程为0.2 mm时由下端气隙出口流出的气体量达到最高,为1.21 mg,同时出口处平均速度峰值可达58.9 m/s,这是由阀片的响应速度、泵吸进气量以及气门的运动规律共同作用所导致的结果。而当阀片的行程进一步减小,气体经过阀口进入气隙的阻力剧增,不仅使得进气量大幅度下降,而且会导致气隙内真空度增加,引起动圈中激励电流的上升,这对于整个温升抑制方案来说是得不偿失的。

上述仿真分析论证了该温升抑制方案的改进措施,首先通过更换材料减轻阀片的厚度以及质量,在此基础上探讨了阀片行程对气隙内流动状态的影响,确定了行程为0.2 mm时气隙内的气体流量以及速度达到了最佳。

5 温升测试试验

检验该温升抑制方案有效性最直观的方法,是进行电磁驱动配气机构长时间运行的温升测试。该方案强化了动圈与永磁体之间气隙的气体流动,能够直接带走主要热源所产生的部分热量,这在一定程度上降低了通过热传导至执行器外表面并最终与空气发生自然对流散发出去的热量,从而抑制执行器整体的温度上升。为了不破坏执行器的内部结构,以铂热电阻作为温度传感器贴附于执行器表面

自上而下的不同位置,并用高精度电阻测试仪来采集其阻值。试验平台如图9所示。



图9 温升抑制试验平台

Fig.9 Testing platform for temperature suppression

1. 进气入口 2. 铂热电阻 3. 发动机缸盖
4. 铝制阀片 5. 碳纤维阀片

试验分别采用3种不同的实施方案作为对比,方案的设定遵循前文的仿真计算:方案1密闭进气入口并取消阀片的配置;方案2为初始方案,应用铝制阀片,其行程为0.3 mm;方案3为改进后的方案,应用碳纤维阀片,其行程为0.2 mm。在发动机转速为4000 r/min工况下,配气机构作长时间稳定运行直至其表面温度趋于稳定。每隔5 min采集一次铂热电阻的阻值,自上而下A、B、C3个测量点的温度变化如图10所示。

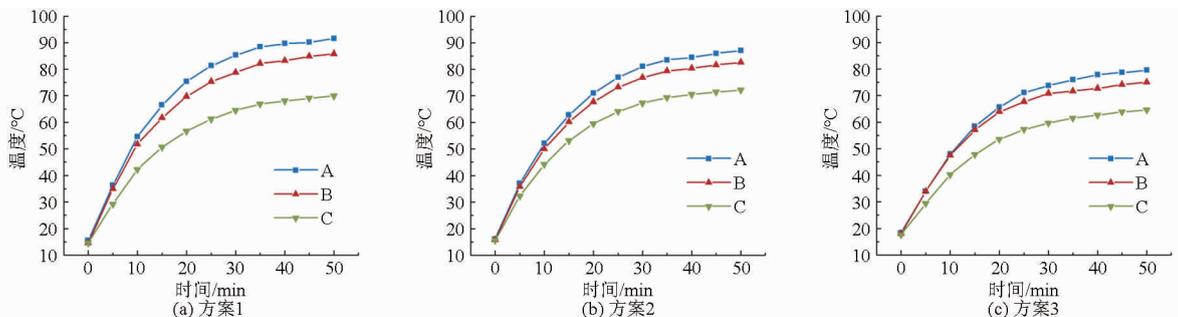


图10 不同方案下的测量点温升曲线

Fig.10 Temperature curves of measuring points under different schemes

执行器在持续工作过程中发热的一般性规律:在3个测量点中位于顶端的A点温度最高,其他两点的温度依次下降,这和执行器下端为开放式的结构设计有着密切关系。采用了铝制阀片的方案2中,A、B两点的温度均有所下降,其中以A点较为明显,下降幅度可达4.5℃,测量点C的温度会略有上升。这是由于气体在狭长气隙内流动过程中,入口段的热边界层较薄,局部表面传热系数比层流充分发展段的高,在此阶段的热交换相对明显,气流会将部分热量由温度较高的顶端带至底端。而采用铝制阀片方案的气体流量较小,不能够有效地降低执行器的整体温度。方案3换用了碳纤维阀片,且根

据仿真结果采用了最佳行程,有效泵吸率明显上升,气体流量以及速度均有了大幅的提高,温升抑制效果愈加明显。如图10中所示,与密闭无阀片的方案1相比,测量点A最高下降了12.1℃,测量点C也有5.3℃的下降幅度。

6 结论

提出了一种基于动圈泵吸效应的电磁驱动配气机构温升抑制方案,根据对流传热理论以及气隙通道的流场仿真论证了方案的可行性。

(1) 流经狭长气隙的气体流量和速度是影响该温升抑制方案的主要因素,在气门运动规律不变的情

况下,二者受阀片的响应速度和阀口结构尺寸影响。

(2) 阀片轻量化能够有效提高其响应速度和有效泵吸率。以碳纤维阀片代替铝制阀片,行程保持为 0.3 mm,气隙出口的气体流量和峰值速度分别增加了 80.8% 和 41.2%。

(3) 碳纤维阀片行程为 0.2 mm 时,单循环下气隙出口的气体质量和峰值速度达到最高,分别为

1.21 mg、58.9 m/s。其行程过大会导致响应速度变慢,有效泵吸率下降;过小则会引起进气阻力增加,进气量减小。

(4) 最后通过温升测试试验验证了改进方案的可行性,其能够有效抑制执行器温升。在测量工况下各测量点中最高温升下降 12.1℃,同比下降 13.2%。

参 考 文 献

- Pischinger M, Salber W, van Der Staay F, et al. Benefits of the electromechanical valve train in vehicle operation [C]. SAE Paper 2000-01-1223, 2000.
- Picron V, Postel Y, Nicot E, et al. Electro-magnetic valve actuation system; first steps toward mass production [C]. SAE Paper 2008-01-1360, 2008.
- Pischinger M, Salber W, van Der Staay F, et al. Low fuel consumption and low emissions-electromechanical valve train in vehicle operation [J]. International Journal of Automotive Technology, 2000, 1(1): 17-25.
- Mohamed E D. Design and experimental investigation on an electromagnetic engine valve train [C]. SAE Paper 2011-01-0365, 2011.
- Frederic A, Picron V, Hobraiche J, et al. Electromagnetic valve actuation system e-valve; convergence point between requirements of fuel economy and cost reduction [C]. SAE paper 2010-01-1197, 2010.
- 刘梁,常思勤. 动圈式电磁驱动气门的分析与设计 [J]. 汽车工程, 2009, 31(8): 733-736.
Liu Liang, Chang Siqin. Analysis and design of a moving-coil electromagnetic valve actuator [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(8): 733-736. (in Chinese)
- Liu Liang, Chang Siqin. Motion control of an electromagnetic valve actuator based on the inverse system method [J]. Proc IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2012, 226(1): 85-93.
- Liu Liang, Chang Siqin. Improvement of valve seating performance of engine's electromagnetic valve train [J]. Mechatronics, 2011, 21(7): 1234-1238.
- 李立毅,潘东华,黄旭珍. 超精密短行程直线电机温度场分析及温升抑制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 112-117.
Li Liyi, Pan Donghua, Huang Xuzhen. Temperature field analysis and temperature rise suppression of ultra-precision short-stroke linear motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 112-117. (in Chinese)
- 张玉秋. 永磁直线伺服电机及其冷却系统研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- Dai Jianguo, Chang Siqin. Loss analysis of electromagnetic linear actuator [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 46(3): 471-482.
- 冀宏,王东升,刘小平,等. 滑阀节流槽阀口的流量控制特性 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 198-202.
Ji Hong, Wang Dongsheng, Liu Xiaoping, et al. Flow control characteristic of the orifice in spool valve with notches [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 198-202. (in Chinese)
- Kays W, Crawford M, Weigand B. 对流传热与传质 [M]. 4版. 赵镇南,译. 北京:高等教育出版社, 2007.
- 潘剑锋,周俊,唐爱坤,等. 微尺度燃烧过程中传热准则数分析 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 197-201.
Pan Jianfeng, Zhou Jun, Tang Aikun, et al. Analysis of criterion number of heat transfer in micro combustion process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 197-201. (in Chinese)
- 刘静. 微米/纳米尺度传热学 [M]. 北京:科学出版社, 2001.
- 任芸,刘厚林,舒敏骅,等. 考虑旋转和曲率影响的 SST $k-\omega$ 湍流模型改进 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 123-128.
Ren Yun, Liu Houlin, Shu Minhua, et al. Improvement of SST $k-\omega$ turbulence model and numerical simulation in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 123-128. (in Chinese)
- 金文,张鸿雁. 微尺度内流流场数值模拟方法及实验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 67-71.
Jin Wen, Zhang Hongyan. Numerical simulating approaches and experiment on micro-scales flow field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 67-71. (in Chinese)
- 覃文洁,胡春光,郭良平,等. 近壁面网格尺寸对湍流计算的影响 [J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 388-392.
Qin Wenjie, Hu Chunguang, Guo Liangping, et al. Effect of near-wall grid size on turbulent flow solutions [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(5): 388-392. (in Chinese)
- 陈锋,王春江,周岱. 流固耦合理论与算法评述 [J]. 空间结构, 2012, 18(4): 55-63.
Chen Feng, Wang Chunjiang, Zhou Dai. Review of theory and numerical methods of fluid-structure interaction [J]. Spatial Structures, 2012, 18(4): 55-63. (in Chinese)